УДК 004.8

А.С. Баранюк
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна
вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01601

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПРОБЛЕМИ КОНТРОЛЮ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ Й РОБОТОТЕХНІКИ

A. Baraniuk
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
60, Volodymyrska St., Kyiv, 01601

RESEARCH ON APPLICATIONS AND PROBLEM OF CONTROL OF SWARM INTELLIGENCE AND ROBOTICS

У даній роботі наведено огляд галузей ройового інтелекту та робототехніки, надано основні характеристики таких систем, їх переваги та недоліки, а також відмінності інших мультиагентних систем від ройових. Окрім цього, надано основні області застосування цих технологій із прикладами, короткі відомості про ройові оптимізації. Описано проблему контролю роїв та можливі шляхи її вирішення, такі як контроль через зміну алгоритмів, параметрів, контроль через середовище та лідерів. Також наведено потенційні області для подальших досліджень.

Ключові слова: штучний інтелект, робототехніка, ройові системи, контроль

This article provides overview of the swarm intelligence and robotics fields, main characteristics of such systems provided, their advantages and disadvantages as well as differences from other multi-agent systems. Also, main fields of application for swarm systems with examples provided apart from short information on swarm optimizations. The problem of swarms' control described and possible solutions for it such as algorithm replacement, parameters change, control through environment and leaders. Apart from that fields for possible future research noted.

Keywords: artificial intelligence, robotics, swarm systems, control

Вступ

Натхнення для ройової робототехніки та інтелекту, як і для багатьох інших технологій, було взято із природи. Ройові організми, такі як бджоли чи мурахи, демонструють здатність формувати складну поведінку і структури при відносній простоті і слабкості кожного окремого представника рою. Слідуючи простим правилам та інстинктам, мурахи, наприклад, здатні будувати мурашники чи навіть плоти із власних тіл, при цьому не маючи наперед підготовленого плану і без можливості обговорити свої наступні дії з іншими. Ройова поведінка, що дозволяє їм виконувати завдання, які окремий представник не може виконати самостійно, формується саме завдяки слідуванню простим правилам, закладеним у цих комахах.

Не дивно, що це викликало зацікавленість з боку інженерів-робототехніків, адже подібні властивості були б дуже корисними. Ройова поведінка комах демонструє можливість створення системи, в якій відносно дешеві і прості роботи могли б виконувати складні завдання. Простота і дешевизна, у свою чергу, дають можливість створювати рої з великої кількості агентів, легко заміняти цих роботів чи навіть жертвувати ними. Також велика кількість агентів здатна створити колективну обчислювальну систему, що може перевищувати можливості окремих складних індивідуальних роботів чи інших комп'ютерних систем. З точки зору програмного забезпечення, роботи можуть слідувати простим алгоритмам, що не вимагатимуть потужної обчислювальної техніки. Додатковим стимулом для розвитку ройової робототехніки є група завдань, в яких зви-

 © А.С. Баранюк

чайні індивідуальні роботи будуть набагато менш ефективними чи взагалі нездатними їх виконати, як, наприклад, пошук на великих територіях чи їх обробка. Основними перешкодами на шляху створення подібних систем була складність і вартість роботів, але сучасний стан розвитку робототехніки дозволяє почати застосовувати такі системи на практиці.

Ройова робототехніка

Ройова робототехніка – це галузь робототехніки, яка займається вивченням та створенням мультиагентних систем, що відповідають таким вимогам [1]:

- роботи рою мають бути автономними, здатними сприймати середовище та діяти в ньому;
- кількість роботів у рою має бути великою або правила контролю мають бути пристосовані до великої кількості агентів;
- рій має складатися з однорідних роботів або з невеликої кількості груп однорідних роботів;
- кожний окремий робот має бути нездатним виконати головне завдання рою або бути неефективним у його виконанні;
- роботи мусять мати обмежені, локальні можливості комунікації та сприйняття, щоб гарантувати децентралізацію системи та її масштабованість.

Ці вимоги також відрізняють ройові системи від інших мультиагентних систем, перш за все вимоги по кількості роботів та їх простоті.

Очікується, що ройова поведінка утвориться внаслідок взаємодії роботів із середовищем та між собою. Ройова робототехніка як галузь утворилася в рамках вивчення штучного ройового інтелекту, а також вивчення біологічних ройових систем.

Переваги мультиагентних систем перед одноагентними [2]:

- покращена ефективність у випадках, коли завдання дозволяє паралельне виконання;
- деякі завдання можуть бути виконані лише групою роботів;
- покращене сприйняття середовища шляхом розширення площі збору інформації;
- розподілена діяльність, адже роботи можуть діяти в різних місцях одночасно;
- стійкість до помилок і відмов, бо втрата одного робота не матиме значного впливу на можливість виконання завдання.

До недоліків можна віднести наступне:

- роботи можуть заважати один одному;
- незнання намірів інших роботів системи, що може погіршувати координацію й навіть призводити до конфліктів у виконанні;
- вартість рою може бути вищою за одного робота для такого ж завдання, але ройова робототехніка прагне до створення якомога дешевших систем.

Враховуючи переваги, можна виділити такі класи задач, які добре підходять ройовій робототехніці [3]:

- завдання, що вимагають покриття великих територій;
- завдання, що є небезпечними для одного робота;
- завдання, що вимагають збільшення або зменшення числа роботів;
- завдання, що вимагають надійності й стійкості до втрат.

Ройовий інтелект

Ройовий інтелект – колективна поведінка децентралізованої природної або штучної системи, здатної до самоорганізації [4]. На початку штучний ройовий інтелект вивчав оптимізаційні алгоритми й був більше відомий як «ройові оптимізації». До них можна віднести такі алгоритми як «оптимізація колонії мурах» [5] чи «оптимізація рою часток» [6]. Ройовими ці алгоритми робило те, що вони працювали асинхронно й децентралізовано, а також те, що прообразом для них стали біологічні ройові системи. Але інтелектуальними, у сучасному розумінні, їх було важко назвати. Такий підхід

© А.С. Баранюк

також не можна було пов'язати із ройовою робототехнікою. Згодом ці підходи стали натхненником багатьох інших оптимізаційних алгоритмів на основі біологічних систем, таких як риби [7], бджоли [8] та інші. Через велику кількість досить схожих за тематикою алгоритмів, деякі критики цих підходів висловили думку, що автори витрачають більше часу на вигадування імен цим алгоритмам, аніж продумують саму їх логіку.

Згодом, почали з'являтися задачі, більш тісно пов'язані із робототехнікою. Ці алгоритми мали на меті контроль пересування великих груп роботів і їх ідеї також частково були запозичені із природи. До них відносяться задачі групування, розсіювання, формування шаблону, спільний рух, розподіл завдань, пошук джерела, колективне транспортування об'єктів та картографування території [9].

Задача групування полягає в тому, що роботи мають зібратися в одному місці якомога щільніше, але без зіткнень. Ця задача необхідна для ряду інших, таких як спільний рух чи формування шаблону. Окрім того, така навичка потрібна роботам для випадку, коли необхідно обмінятися інформацією, враховуючи обмеження на можливість обміну інформацією й сприйняття. Задача розсіювання полягає у зворотному: агентам необхідно покрити якомога більшу територію, але при цьому не втрачаючи зв'язок.

Задачі формування шаблону й спільний рух є надбудовами над попередніми задачами. Формування шаблону полягає в тому, що агенти мають сформувати із себе й підтримувати якусь форму. Додаткова складність проявляться через локальні комунікації й сприйняття агентів. Спільний рух поділяється на два види: рух із підтримкою строю й без. У випадку підтримки строю агенти мають рухатися в одному напрямку, підтримуючи своє положення відносно інших агентів. Для випадку відсутності строю необхідно просто рухатися в одному напрямку, уникаючи зіткнень.

Наступна група завдань та алгоритмів, що їх вирішують, є більш інтелектуальною й має набагато вищий рівень складності. Задача розподілу завдань дозволяє роботам вирішувати, чим саме з певного переліку завдань, у даний момент, вони мають займатися. Пошук джерела є класичною задачею пошуку якогось об'єкта, але, зазвичай, на великих територіях. Задача транспортування може бути дуже ефективно виконана саме ройовою системою через кооперацію під час транспортування одного об'єкта чи паралельного транспортування кількох. Приклад мурах, як біологічного рою, демонструє потенційні можливості штучних ройових систем у цій сфері. Задача колективного картографування має великий потенціал для рою, але досить складна в реалізації через низку причин, таких як обмеження в комунікації чи необхідність об'єднання результатів з багатьох роботів в одне зображення.

З розвитком машинного навчання та інтелектуальних систем, а також апаратного забезпечення, здатного працювати із ними в реальному часі, відкрилися можливості створення ройових систем, що можуть виконувати комплексні завдання, такі як пошук чи транспортування. Перевага застосування такого підходу також у тому, що агенти здатні навчатися самостійно й не потребують ручної розробки ройового алгоритму. Навчання з підкріпленням [10] є найбільш перспективною областю машинного навчання для ройових систем.

Проблема контролю

З розвитком ройових технологій й систем постає питання їх контролю й взаємодії з людиною. Проблема контролю рою полягає в декількох аспектах [11].

Першою проблемою є складність. Може бути кілька підходів до керування роєм оператором. Найпростішим випадком є пе-

© А.С. Баранюк

редача команд кожному роботу окремо. Явним недоліком є те, що рій, за визначенням, потенційно включатиме в себе велику кількість роботів, що може сягати тисяч. Передача команд оператором кожному роботу займе дуже багато часу. Також малоймовірною є можливість людини відслідковувати дії і стан такої кількості роботів. Альтернативою є розбивка рою на групи й надання їм команд. Це зменшує кількість команд, необхідних для контролю. Тепер складність обмежується кількістю підгруп. Але це також означає, що рій має самостійно «додумувати» свої дії в середині групи.

Іншою проблемою контролю є комунікація між оператором і роєм. Складність полягає як в апаратній реалізації, так і з точки зору самої ідеї. Взаємодію з роєм можна поділити на два види: віддалену та інтегровану. Перший тип означає, що оператор взаємодіє й керує роєм віддалено, використовуючи комп'ютерні системи та системи зв'язку. Такий підхід використовується частіше, але має кілька недоліків, таких як затримка в передачі сигналу, його поширення між роботами та ускладнення через асинхронність їхньої роботи. Другий вид означає, що оператор знаходиться у тому ж середовищі, що й рій, і безпосередньо взаємодіє з ним. У такому випадку оператор може сприйматися навіть як особливий представник рою. Такий підхід усуває проблему затримки, наприклад, але далеко не в усіх ситуаціях оператор може знаходитися поруч з роєм, як-от у випадках небезпечних для життя середовищ.

Наступною проблемою є інтерфейс та відображення стану рою. Це дуже важливий аспект контролю, адже у випадку непродуманого інтерфейсу оператор не матиме точного представлення про рій, положення роботів і їх динаміку. Це, у свою чергу, унеможливить контроль як такий, адже команди оператора, що базуватимуться на неточних даних, можуть стати перешкодою в роботі усієї системи. Складність полягає не лише у відображенні рою, але й у відображенні його намірів та впливу команд на нього. На цю проблему також може впливати проблема комунікації, а саме затримка в передачі даних чи проблеми окремих роботів з їх відправкою й отриманням, неточність сенсорів і помилки. Також потрібно розробити алгоритми переведення вводів команд оператора через інтерфейс у зрозумілу для роботів форму.

Але сама поява оператора створює ще одну проблему. Це централізує рій, значно послаблює його асинхронність. Оператор стає місцем потенційних помилок і точкою вразливості. Ройові системи мають перевагу у своїй стійкості до помилок і втручання саме завдяки незалежності окремих представників рою. З втратою частини агентів решта може продовжувати виконувати завдання. Якщо рій занадто залежить від керівництва оператором, то з втратою цього контролю рій втратить можливість працювати. Введення контролю має підтримувати баланс між абсолютною децентралізацією ройових систем і можливістю все ж таки впливати на них ззовні.

Існує декілька основних напрямків алгоритмів контролю ройових систем [11]:

- зміна ройових алгоритмів;
- зміна параметрів рою;
- непрямий вплив через середовище;
- використання особливих членів рою (лідерів).

Зміна ройових алгоритмів передбачає, що оператор керуватиме роєм шляхом вибору ройового алгоритму, якому слідуватимуть агенти, в той чи інший момент. Такий підхід вимагає наявності бібліотеки ройових алгоритмів, які відомі всім представникам рою, з яких обиратиме оператор. Це досить простий підхід, але він вимагає високого рівня автономності роботів, адже вони мають чітко й самостійно дотримуватися обраного оператором алгоритму.

Зміна параметрів рою означає, що оператор керуватиме роєм шляхом зміни параметрів у ройовому алгоритмі, якого дотримуються роботи. Це дозволяє впливати на рій, не змінюючи напряму його поведінки, що значно краще з точки зору децентралізації. Але такий підхід застосовується рідше, адже підбір параметрів, зазвичай, робиться на етапі створення алгоритму.

Вплив через середовище означає, що керування роєм здійснюватиметься шляхом зміни оператором середовища, у якому діє рій. Зазвичай, це віртуальні зміни, але можливий і фізичний вплив. Це може бути встановлення чи прибирання перешкод, використання віртуальних феромонів чи маяків. Передбачається, що ройовий алгоритм, якому слідують роботи, враховуватиме такі зміни в середовищі та реагуватиме на них. Такий підхід зберігає властивості рою, адже залишає децентралізацію і автономність системи, а також не змінює напряму її поведінки, що є захистом від потенційних помилок оператора чи у випадку зникнення контролю.

Використання лідерів застосовується, коли потрібен постійний контроль або дуже часте коригування дій рою з боку оператора. Такий підхід включає в себе визначення певних представників ройової системи як лідерів, з якими напряму взаємодіє оператор. Такі лідери можуть обиратися завчасно й навіть фізично відрізнятися від решти рою або ж призначатися з представників системи динамічно. Алгоритм, якому слідує рій, має враховувати таких лідерів і, відповідно, реагувати на їхні дії та може мати різні рівні централізації.

Застосування

У роботі [12] описано систему, що займається кластеризацією та збором об'єктів. Ця задача полягає у тому, що роботи мають зібрати в одному місці об'єкти, що розміщені на певній території, або ж збудувати якусь конструкцію з них.

Також є проєкти, направлені на колективне транспортування об'єктів, які не можуть бути переміщені одним роботом. Існує три можливих підходи до вирішення цього завдання: штовхання, підтягування та оточення об'єкта.

Ройову систему також можна використовувати для навігації. У цьому випадку рій формує мережу, яку інші окремі роботи, рої чи будь-хто інший можуть використовувати для орієнтування на місцевості. Прикладом може бути система допомоги в навігації наземним роботам повітряними [13].

Іншим цікавим завданням є спроба оминати дірки або ями. Для рою завдання ускладняється, якщо роботи рухаються в строю і потрібно його не зламати. Або ж роботи можуть збудувати якусь структуру із себе, аби подолати перешкоду. Приклад такої системи описаний у роботі [14].

Важливим завданням для рою й можливості прийняття ним рішень є досягнення консенсусу. Спілкування відбувається або через прямий обмін повідомленнями, або непряму комунікацію через середовище. Дослідження цієї проблеми продемонстровано у роботі [15].

Висновки й подальші дослідження

Ройові системи мають великий потенціал у вирішенні кластеру задач, що потребує спільної роботи великої кількості роботів. До таких задач належать, наприклад, пошукові задачі, транспортні чи будівельні. Природні ройові системи, такі як мурахи чи бджоли, продемонстрували свою здатність ефективно їх вирішувати. Розвиток цієї технології стримувався обмеженнями в робототехніці, її вартістю, а також обмеженими обчислювальними можливостями. Сучасний стан розвитку цих технологій, а також моделювання, дозволяє активніше використовувати й досліджувати ройові технології.

Ройовий інтелект може бути використаний і без робототехніки. Агенти ройової системи можуть бути суто віртуальними й

 © А.С. Баранюк

виконувати пошукові задачі, наприклад, на великих даних чи в мережі Інтернет. Також цю технологію використовують для моделювання поведінки людей, наприклад, адже поведінка натовпу багато в чому є ройовою, кожен представник підпорядковується простим правилам, які легко відтворити.

Подальші дослідження в цій області включатимуть у себе активне використання технологій машинного навчання, особливо навчання з підкріпленням. Дані технології дозволять зробити рій більш адаптивним і інтелектуальним, що дасть можливість не програмувати його напряму й створювати узагальнену поведінку, здатну реагувати на зміни умов задачі. Окремої уваги потребує проблема контролю. Більшість описаних вище підходів до керування роєм хоча б частково порушує вимоги до ройових систем, перш за все децентралізацію. Необхідно розробляти гібридні алгоритми, де контроль рою оператором буде інтегровано в ройову поведінку, не порушуючи її. Найбільш перспективним є метод контролю через середовище. Він дозволить уникнути прямого впливу на рій і не порушувати принципу автономії, даючи при цьому можливість вносити зміни у поведінку системи. Також перспективним є створення модульних алгоритмів, що дозволило б легко адаптувати рій до незначних змін цілей в однотипних завданнях.

Ще однією великою областю для дослідження є розподіл ройової системи на підсистеми, їх взаємодія, контроль та об'єднання назад у спільний рій, а також взаємодія декількох роїв, що можуть діяти на різних рівнях абстракції. Це б дозволило вирішувати значно складніші комплексні завдання, що також потенційно спростило би контроль ройових систем.

Перешкодою на шляху досліджень може стати складність і вартість використання роботів під час навчання й тестування ройових алгоритмів. Проте вирішенням може стати моделювання ройових систем і останнім часом активно розвиваються технології, що здатні створити достатньо наближену до реальності модель.

References

1. Şahin E., Spears W. (2005) *Swarm robotics: from sources of inspiration to domains of application in Swarm Robotics Workshop: State-ofthe-Art Survey*. Lecture Notes in Computer Science, no. 3342, 10–20.
2. Arkin C. R. (1998) *Behavior-Based Robotics.* MIT Press.
3. Tan Y., Zheng Z.-Y. (2013) *Research Advance in Swarm Robotics.* Defence Technology v. 9, 18-39
4. Beni, G., Wang, J. (1993). *Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems.* NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, 26–30
5. Colorni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V. (1992) *Distributed Optimization by Ant Colonies*. 1st European Conference on Artificial Life, 134–142
6. Kennedy, J., Eberhart, R.C. (1995) *Particle Swarm Optimization.* IEEE Int'l Conference on Neural Networks, 4, 1942–1948
7. Li LX, Shao ZJ, Qian JX (2002) *An optimizing method based on autonomous animals: fish-swarm algorithm*. Syst Eng Theory Practice, 32–38.
8. Karaboga, D. (2005) *An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization*. Technical Report, Erciyes University.
9. Iñaki N., Fernando M. (2012) *An Introduction to Swarm Robotics.* ISRN Robotics.
10. Richard S. S., Barto A. G. (2018) *Reinforcement Learning: An Introduction second edition*. The MIT Press Cambridge.
11. Kolling A., Walker P., Chakraborty N., Sycara K., Lewis M. (2016) *Human Interaction With Robot Swarms: A Survey.* IEEE Transactions on Human-Machine systems, vol 46, no. 1.
12. Justin, W. (2006) *Extended Stigmergy in Collective Construction*. Radhika, N. (ed.), vol. 21, 20- 28.
13. Ducatelle, F., Di Caro, G., A., Pinciroli, C., Mondada, F., Gambardella, L. (2011) *Communication assisted navigation in robotic swarms: Self-organization and cooperation*. Intelligent Robots and Systems IEEE/RSJ International Conference, 4981-4988.
14. Trianni, V., Nolfi, S., Dorigo, M. (2006) *Cooperative hole avoidance in a swarm-bot*. Robotics and Autonomous Systems 54, 97-103.
15. Montes de Oca, Ferrante M., Scheidler E., Pinciroli A., Birattari C., Dorigo M. (2011) *Majorityrule opinion dynamics with differential latency: a mechanism for self-organized collective decision-making*. Swarm Intelligence 5, 305-327.

RESUME

A. Baraniuk

Research on applications and problem of control of swarm intelligence and robotics

The number of tasks which are being solved by robots is growing. With technologies becoming cheaper and more available possible areas for these tasks are also growing. Now robots can be used in larger numbers and so be used in tasks demanding a lot of agents. Such tasks include, for example, search over big areas or objects transportation. For this kind of problems swarm robotics is best suited since it is based on simultaneous usage of theoretically limitless number of robots.

This article provides description of swarm robotics as well as area of artificial intelligence called "swarm intelligence" which is tasked with creation of algorithms for intelligent solution of problems that swarm systems face with. Swarm intelligence has partly emerged from swarm optimizations algorithms. Also, examples of classic swarm intelligence tasks provided (aggregation, dispersion, pattern formation and flocking) and more advanced that are based on those (area mapping, transportation, search etc.).

Controlling swarm systems is a separate problem because of, for example, number of agents, ways of communication, interfaces etc. Article provides main ways of solving it such as change of algorithms, parameters tuning, control through environment and through leaders. Using environment for control is the most acceptable way since it does not break decentralization of a swarm which is a very important feature of swarm systems as it increases their reliability and resistance to errors and failures.

Shown examples with references of swarm systems usage such as, for example, objects clusterization, shared transportation, tasks distribution, consensus achievement etc. Also provided information on future areas of research such as active usage of machine learning algorithms, especially reinforcement learning, and research on creation and control of swarm systems that are formed by subswarms. Obstacles for such research are described and achievements of other computer science fields that could, on the other hand, make it easier.

Надійшла до редакції 11.12.2019

© А.С. Баранюк